Versauerung der Ökosphäre

Ein Großexperiment, dessen Folgen man nicht vorhersagen konnte

Es wird viel von anthropogenen Klimaänderungen geredet. Kaum jemand denkt daran, daß der Mensch in erster Linie das „chemische Klima" verändert hat. In Mitteleuropa z. B. gelangen 100mal mehr Säuren und Schwermetalle in die Waldökosysteme als man für eine vom Menschen unberührte Natur annehmen kann. Die schleichende Vergiftung der Ökosphäre beginnt sich bemerkbar zu machen.

Prof. Dr. Bernhard Ulrich hat sich nach einem Studium für Bodenkunde und Pflanzenernährung habilitiert. Seit 1965 leitet er das Insitut für Bodenkunde und Waldernährung der Universität Göttingen und beschäftigt sich mit dem Stoffhaushalt von Waldökosystemen.

Unter den anthropogenen Luftverunreinigungen dominieren mit Abstand die Säurebildner SO_2 und NO_x. *Tabelle 1* zeigt, welche unvorstellbaren Mengen davon jährlich in die Atmosphäre eingebracht werden. Es gibt keinen Zweifel an der vollständigen Umwandlung dieser Gase in die entsprechenden Säuren. Kraftwerke sind zu knapp 50% beteiligt, die Industrie zu 24% und der Verkehr zu 19%.

In der Atmosphäre reagieren Säurebildner sowie Säuren mit natürlichen Komponenten der Luft (Wasser, Sauerstoff) und organischen Luftverunreinigungen sowie Staub. Die Ausgangsstoffe und/oder die Reaktionsprodukte werden in die Ökosphäre eingetragen und reagieren mit den dort vorhandenen Stoffen.

Freisetzung potentiell toxischer Stoffe

Aus den chemischen Reaktionsmöglichkeiten, die wir in diesem Kapitel kurz besprechen, folgt zwangsläufig, daß die gesamte – nicht durch Carbonate und Silikate abgepufferte – emittierte Säuremenge zur Freisetzung potentiell toxischer Stoffe direkt in der Luft oder nach Eintrag in die Ökosphäre führt. Dies ist unabweislich, es ist die chemische Konsequenz der Emission der Anhydride starker Säuren unter den Gegebenheiten der stofflichen Zusammensetzung der Ökosphäre.

Schwefelsäure und Salpetersäure sind wie Salzsäure starke Säuren, die die Tendenz haben, durch Reaktion mit Basen schwächere Säuren zu bilden. Als Basen stehen in der Luft (vorwiegend aus anthropogenen Luftverunreinigungen) und in der Ökosphäre drei Gruppen zur Verfügung:

- Alkali- und Erdalkali-Carbonate und -Silikate: Bei der Reaktion mit starken Säuren entstehen die Alkali- und Erdalkali-Sulfate und -Nitrate und als schwache Säuren Kohlensäure und Kieselsäure. Diese beiden Säuren gehen bei pH-Werten unter 7 bis 5 in Wasser sowie in die Säureanhydride CO_2 und SiO_2 über. Die Protonen der starken Säuren sind in diesem Fall in die schwächste Säure übergegangen, die es gibt: das Wasser. Dies entspricht einer Neutralisierung. Die Säuren sind beseitigt, die gebildeten Salze sind Nährstoffe, deren Toxizitätsschwelle erst bei hohen Konzentrationen liegt.
- Ammoniak NH_3: Eine in der Luft erfolgende Abpufferung der gebildeten Schwefelsäure und Salpetersäure wird in der Ökosphäre wieder rückgängig gemacht – sie ist nur vorübergehend und muß bei einer Bilanzbetrachtung außer Betracht bleiben.
- Oxidische und silikatische Verbindungen von Aluminium und Schwermetallen: Schwermetalle gelangen bei industriellen Prozessen und bei der Kohleverbrennung in die Luft, z. T. als Asche, z. T. jedoch auch gasförmig: Bismut, Cadmium, Quecksilber, Thallium, Zink, ferner Arsen, Chlor, Fluor. In den Bodenmineralen sind besonders Aluminium, Eisen und Mangan enthalten, aber auch andere Schwermetalle und Metalloide. Die Reaktion mit starken Säuren führt zur Bildung von Verbindungen, die als Kation-Säuren bezeichnet werden. Kation-Säuren können durch Reaktion mit Wasser Protonen bilden. Sie sind potentielle Zellgifte.

Emittentengruppe	SO_2 kt/Jahr	NO_x kt/Jahr	$SO_2 + NO_x$ kmol H^+ pro ha und Jahr
Kraftwerke			
Fernheizwerke	2000	940	3.3
Industrie	990	580	1.7
Haushalte			
Kleinverbraucher	450	140	0.7
Verkehr	100	1340	1.3
Summe	3540	3000	7.0

Tabelle 1: Emission von Schwefeldioxid und Stickoxiden in der Bundesrepublik im Jahr 1978 in Kilotonnen (kt) pro Jahr [1] und in kmol Säureäquivalenten (H^+) pro Hektar und Jahr.

Sowohl die Anhydride wie die Säuren können ferner direkt oder indirekt mit organischen Verbindungen reagieren und dabei neue, evtl. toxische organische Moleküle bilden. In der Luft sind es besonders die Stickoxide, die mit Kohlenwasserstoffen (aus Luftverunreinigungen) bei hoher UV-Einstrahlung Photooxidantien, d. h. reaktionsfähige Verbindungen mit stark oxidativer Wirkung, bilden: Leitsubstanz ist Ozon. In sonnenscheinreichen Jahren, bevorzugt in den Küstengebieten, können neuerdings, d. h. wohl als Folge der ständig ansteigenden NO_x-Emission, auch in Europa örtlich phytotoxische Ozonkonzentrationen auftreten.

Auch die organische Bodensubstanz wird unter dem Einfluß starker Säuren verändert. Im Boden kommen organische Säuren in Form von Humus vor. In Gegenwart starker Säuren entstehen wasserlösliche Humusstoffe mit stärker sauren Gruppen, die in der Bodenlösung auftreten können und mit Aluminium- und Schwermetall-Kationen wasserlösliche Komplexe bilden. Die Komplexe können bis pH 6 erhalten bleiben. Hierdurch wird die Mobilität der Kation-

Foto: Bernd G. Enke, Allgem. Forstzeitschrift Stuttgart

Bild 1: Folgen des sauren Regens: Abgestorbene Tannen und Fichten in einem Baumwaldgebiet bei Steinhäusle im Schwäbischen Wald. Ministerpräsident Späth hat diesen Wald erst Ende Januar besucht, um sich selbst von dem Ausmaß der Schäden zu überzeugen.

Säuren in der Ökosphäre erhöht. Zwar wird ihre akute Toxizität vermindert, ihre chronische Toxizität bleibt dagegen erhalten.

Wie es zur Versauerung kommen muß

Pufferkapazität und Pufferrate von Carbonaten und Silikaten sind damit die entscheidenden Kenngrößen für die in der Ökosphäre zu erwartende Entwicklung. Die puffernde Wirkung von Carbonaten ist in der Luft nur sehr beschränkt möglich, selbst wenn gleichzeitig mit SO_2 und NO_x pufferfähige Stäube emittiert werden. Die Reaktion setzt voraus, daß der Staub benetzt ist. Nach Verlassen des Schornsteins unterliegen jedoch das gasförmige SO_2 und NO_x einer anderen Verteilung in der Atmosphäre als der partikuläre Staub, der relativ nahe der Emissionsquelle sedimentiert. Man kann also nur mit einer Teilneutralisation rechnen, deren Ausmaß von der Witterung abhängig ist und die sich fast nur in der Umgebung des Emittenten auswirkt.

Auch im Boden kann die hohe Pufferrate der Carbonate nur dann zur Geltung kommen, wenn die Carbonate gleichmäßig im Feinboden verteilt sind. Es gibt jedoch in Mitteleuropa kaum noch Waldböden, in denen Carbonate im Oberboden in feiner Verteilung vorkommen. Die Landwirtschaft versucht seit über 100 Jahren, den Reaktionszustand des Bodens durch Kalkung konstant zu halten: dies wird auch, wie die Bodenuntersuchungen zeigen, im Wesentlichen erreicht.

Im Wurzelraum von Waldböden dagegen ist mit ganz wenigen Ausnahmen die Pufferkapazität der Carbonate erschöpft, zur Pufferung verbleiben die Silikate. Aber auch deren Kapazität reicht nicht aus, sie beträgt nur einen Bruchteil der durchschnittlichen Säureemission. Damit ist die Versauerung carbonatfreier Waldböden mit der Konsequenz der Freisetzung potentiell toxischer Aluminium- und Schwermetallkationen vorgezeichnet.

Die schleichende Vergiftung der Ökosphäre

Aus dem Gesagten ergibt sich, daß eine die Pufferrate durch Silikate übersteigende Emission von säurebildenden Gasen langfristig zur Versauerung der Ökosphäre führen muß. Diese Versauerung bedeutet die Mobilisierung toxischer Metallkationen, Metalloide und organischer Säuren in der Ökosphäre. Dieser Vorgang läuft nicht erst seit kurzem, sondern großflächig seit Beginn der Industrialisierung. Er wird uns allerdings erst heute bewußt.

Der Vorgang hat die schleichende Vergiftung der Ökosphäre zur Folge. Es ist zu erwarten, daß die gesamte Ökosphäre betroffen ist, auch wenn natürlich sowohl im Zeitablauf wie in den Symptomen vollständig andere Entwicklungen in hochragenden langlebigen Waldökosystemen eintreten als in kurzlebigen landwirtschaftlichen Kulturen auf gekalkten Böden. Vor allem Einzelbäume in einer Landschaft und Wälder in den höheren Lagen der Mittelgebirge, besonders in den Außenhängen und Plateaulagen, sind den Emissionen in besonderem Maße ausgesetzt. Durch Bodenversauerung wird das Risiko noch weiter erhöht.

Gewässer sind besonders dann gefährdet, wenn die Böden im Liefergebiet tiefreichend stark versauert sind; oder wenn das Sickerwasser so rasch durch den Boden fließt, daß die Pufferreaktionen nicht ablaufen können. Letzteres ist besonders in Gebieten mit sandigen oder kiesigen Böden und anhaltender hoher Schneedecke der Fall (z. B. in Skandinavien). Die während des Winters deponierten Luftverunreinigungen sammeln sich zunächst in der Schneedecke an und gelangen mit dem Schmelzwasser im Frühjahr bei nur geringer Wechselwirkung mit dem Boden in die Gewässer. Sie führen dort zur Versauerung (*Persson* 1982).

Die obigen Aussagen ergeben sich als Schlußfolgerungen aus der Anwendung chemischer Kenntnisse auf bekannte Emissionsraten und Reaktionsmöglichkeiten in der Ökosphäre. Die Wissenschaft hat in solchen Fällen drei Aufgaben:

- Durchführung einer Risikoanalyse,
- Versuch der Falsifizierung von Tatbeständen,
- Aufdeckung von Wirkungsketten.

Betrachtet man die gegenwärtige Situation, so läßt sich feststellen: Die Risikoanalyse steckt in ihren ersten Anfängen, sie wurde im wesentlichen durch das einsetzende Waldsterben erst ausgelöst. Sie ist bisher noch das Anliegen einzelner und wird von den Medien in die Öffentlichkeit getragen.

Falsifizierung der Tatbestände

Toxikologisch kann man das Problem des Waldsterbens als Wechselwirkung einer durch viele Giftstoffe additiv bewirkten chronischen Toxizität (Langzeitwirkung) mit einer durch jeweils andere Giftstoffe ausgelösten akuten Toxizität (Kurzzeitwirkung) definieren. Die Akkumulationsdauer bis zum Sichtbarwerden einer Schädigung kann viele Jahrzehnte betragen.

Die chronische Toxizität entzieht sich daher der in der Toxikologie üblichen Ermittlung von Dosis/Wirkungs-Beziehungen. Wir haben mit der Emission von Luftverunreinigungen seit Beginn der Industrialisierung gewissermaßen ein Großexperiment von hemisphärischem oder gar globalem Ausmaß begonnen, dessen Tragweite wir uns jetzt erst bewußt werden.

Wir haben nicht rechtzeitig erkannt, wie wir die Dosis zu messen haben (nämlich als Eintragsraten von Stoffen in das Ökosystem), sondern haben als Dosis nur die für die akute Toxizität verantwortlichen Stoffkonzentration in der Luft gemessen und unsere Schutzmaß-

nahmen darauf abgestellt. In dem seit über einem Jahrhundert laufenden Großexperiment treten wir jetzt in die Phase des Sichtbarwerdens der Langzeitwirkung ein. Dies ist am Aussterben von Arten („Rote Liste"), am Fischsterben in Skandinavien und Nordost-Amerika, am Waldsterben in Mitteleuropa und am Baumsterben in unseren Städten und in der freien Landschaft zu erkennen. Dehnt man die Betrachtung wie in dieser Aufzählung auf die Ökosphäre aus, so müssen in die Liste der Giftstoffe auch Biolozide und Streusalz aufgenommen werden.

Über die Belastung liegen Informationen vor, die allerdings die verschiedenen Aspekte sehr ungleich abdecken. Der niedere pH-Wert des Regenwassers hat die Konsequenz, daß emittierte Schwermetalle und Metalloide im Niederschlag zu über 90% in gelöster, d. h. in toxisch wirksamer Form vorliegen [2]. Aufgrund theoretischer Überlegungen [3] können Tau, Rauhreif und Nebel zusammen mit vorheriger trockener Deposition von SO_2 zu extrem niederen pH-Werten (unter 2,0) führen. Oberflächenschäden scheinen unvermeidbar. Neue Messungen zeigen, daß die ersten Tropfen eines Niederschlags ebenfalls stark sauer sein können. Dies läßt vermuten, daß die untersten Wolkenschichten, aus denen die ersten Niederschlagsanteile gespeist werden, besonders häufig stark saure Tröpfchen enthalten. Diese Wolkenschichten werden häufig vom Wind in die Kronen der Wälder eingetragen. Depositionsmessungen im Solling bestätigen das Auftreten von pH-Werten unter 3 (monatliche Mittelwerte bis pH 2,75) im Benetzungswasser (Kronentraufe) des Fichtenbestands [4, 5]. In den Lagen, wo solche Ereignisse häufig auftreten, sind auch die Waldschäden besonders stark. Dort scheinen gleichzeitig auch hohe Ozon-Gehalte in der Luft aufzutreten, während der SO_2-Gehalt relativ gering ist.

Je nach Witterung können in diesen Lagen demnach akute Schäden durch niedere pH-Werte im Benetzungswasser, durch toxische Schwermetallkonzentrationen im Benetzungswasser, durch Ozon und durch SO_2 ausgelöst werden: Das eine schließt das andere nicht aus. Die akute Schädigung kann zudem durch ein episodisches Ereignis, d. h. durch eine Belastungsdauer von Stunden, Tagen oder Wochen, ausgelöst werden.

Beispiel Solling

Welche Folgerungen ergeben sich aus den Emissionsdaten und den Reaktionsmöglichkeiten starker Säuren? Betrachten wir dazu die Stoffbilanzen des im Solling langjährig untersuchten Fichtenökosystems *(Tabelle 2)*.

Der Gesamt-Säureeintrag in diesem relativ stark belasteten Bestand (Plateaulage eines Mittelgebirges) liegt mit 5,1 kmol deutlich unter der mittleren Emissionsrate (7 kmol, siehe *Tabelle 1)*. Sicherlich gibt es in stärker exponierten Lagen auch noch höhere Säureeinträge. Der Säureaustrag übersteigt seit 1977 und nunmehr auch im Mittel der Beobachtungsjahre den Säureeintrag. Dies zeigt, daß die Fähigkeit des Bodens, Säure abzupuffern oder zu speichern, erschöpft ist, daß periodisch sogar früher gespeicherte Säure an das Sickerwasser abgegeben wird. Der Säureeintrag wird damit quantitativ an den Sickerwasserleiter weitergereicht. Wenn dessen Pufferkapazität (Gehalt an Puffersubstanz mal durchströmtem Volumen) erschöpft ist, bricht die Säure in die Hydrosphäre (Quellen, Grundwasser) durch. Bei den hohen Versickerungsgeschwindigkeiten (z. B. nach der Schneeschmelze) kann dieser Durchbruch schon vor Erschöpfung des Puffers erfolgen, weil die Zeit zur Gleichgewichtseinstellung fehlt. Von der eingetragenen Säure sind 70% Protonen, der Rest hauptsächlich NH_4^+. Von der ausgetragenen Säure sind nur 7% Protonen, der Rest überwiegend Al-Ionen, NH_4 fehlt.

Der Basen-Eintrag ist wesentlich geringer. Das Fichtenökosystem kann das eingetragene Nitrat nicht mehr für die Eiweißbildung ausnutzen.

Die Schwermetall-Bilanzen für dasselbe Ökosystem [6] ergaben kurz zusammengefaßt, daß die deponierten Schwermetalle zu erheblichen Anteilen in den Blättern, in Rinde und Holz, im Auflagehumus akkumuliert werden, während sie gleichzeitig aus dem Mineralboden ausgetragen werden. Bei konstanter Masse bedeuten Akkumulationsvorgänge steigende Konzentrationen, z. B. steigende Gehalte in der Biomasse. Soweit eine solche Anreicherung toxische Stoffe betrifft, muß sie als Tendenz zur Vergiftung bzw. in einem späteren Stadium als zunehmende Vergiftung bezeichnet werden.

Diese Stoffbilanzen haben somit die allgemeine Hypothese nicht falsifiziert, im Gegenteil: Sie quantifizieren ihre Aussagen – Versauerung der Ökosphäre, Mobilisierung toxischer Stoffe, Akkumulation von Giften – für bestimmte Stoffe und Ökosysteme.

Wirkungsketten

Die Aufklärung der Wirkungsketten kann nur von einer integrierten Forschung erwartet werden, die alle Aspekte von der Ökosystemanalyse bis zur Biochemie und Pathologie umfaßt. Die Probleme fangen hier bereits damit an, wie man einen solch weitgespannten Forscherverbund überhaupt organisieren soll. Die Probleme werden sehr weit in die einzelnen Wissenschaftsbereiche hinein ausstrahlen. Ihre Bearbeitung wird zu grundsätzlichen Erkenntnissen führen.

Hinsichtlich der Belastbarkeit eines Waldökosystems zeigt das Waldsterben: Die verschiedenen natürlichen, z. B. klimatischen, und anthropogenen Streßfaktoren wirken zusammen und die toxische Wirkung eines Schadstoffs kann eine vorher durch einen anderen Faktor bewirkte Veränderung im System voraussetzen. Die Abfolge kann z. B. sein: Bodenversauerung – Schädigung von Mikroorganismen der Zersetzerkette – Entkopplung des Ionenkreislaufs mit interner Säurebildung – Schädigung von Wurzeln – Schädigung im Sproß.

Dabei können für die Vorgänge im Boden der Säureeintrag, für die Schädigung im Sproß Schadstoffe wie SO_2, Protonen (niedere pH-Werte), Schwermetalle, Oxidantien verantwortlich sein. Die Schädigung im Sproß kann zusätzlich noch an eine extreme Witterungssituation geknüpft sein, die entweder einen hohen Schadstoffeintrag bewirkt und/

	Säuren ($H^+ + NH_4 + Al^{3+} + Mn^{2+} + Fe^{3+}$)	Basen (NO_3^-)
	kmol Ionenäquivalente pro Hektar und Jahr	
Niederschlags-Deposition Interzeptions-Deposition	1.8 3.3	0.6 0.5
Gesamt-Deposition = Eintrag Austrag mit dem Sickerwasser (ab 1973)	5.1 6.2	1.1 1.0
Eintrag – Austrag = Bilanz	−1.1	+0.1

Tabelle 2: Säure/Basen-Bilanz des Fichtenbestands im Solling (Mittelwerte 1969 bzw. 1973 bis 1981: Meßwerte für die einzelnen Ionen und Jahre siehe *Matzner* et al. 1982).

oder auf Blättern und Rinde die mechanischen Voraussetzungen dafür schafft, daß die mobilen Schadstoffe in das Gewebe eindringen können. Die Wirkungskette kann jedoch auch mit der Schädigung von Wurzeln aus anderer Ursache, z. B. Trockenheit, mechanische Beschädigung, Sauerstoffmangel in nassen Jahren, beginnen.

Das Waldsterben läßt ferner erkennen, daß es als Folge der langfristigen Einwirkung von Schadstoffen zu einer Minderung der Elastizität des Ökosystems und der Vitalität der Organismen kommt. Dies ist dann die Ursache dafür, daß andere (natürliche und anthropogene) Schadursachen zu wesentlich schwereren Schädigungen führen können als dies bisher die Regel war.

Es ist deshalb möglich, daß es dieselbe Schädigung schon früher gegeben hat (z. B. Tannensterben).

Die Wechselwirkung verschiedener Schadursachen beim Zustandekommen einer Schädigung läßt sich am besten mit dem von *Lewitt* [7] in die Biologie eingeführten Konzept von „Streß und Strain" erfassen (Strain = Vorbelastung). Das Konzept wurde in der Physik entwickelt und wird auch in anderen Naturwissenschaften wie der Geologie angewendet. Die Wirkung von Streß führt im belasteten System zu Strain. Abhängig vom Reaktionsvermögen des Systems kann der Strain elastisch oder plastisch sein. Plastischer Strain heißt, daß bestimmte Eigenschaften des Systems anhaltend verändert wurden. Diese Veränderungen können sichtbar oder unsichtbar sein. Sichtbarer plastischer Strain wird gegebenenfalls Schädigung genannt. Plastischer Strain braucht nicht irreversibel zu sein; während elastischer Strain sich nach Aufhören der Einwirkung eines Stressors unmittelbar zurückbildet, kann die Rückbildung beim plastischen Strain nach einer Latenzzeit eintreten oder auch ausbleiben.

Mit diesem Konzept lassen sich die bei der gleichzeitigen Einwirkung verschiedener Streßfaktoren eintretenden Verstärkungen verstehen. Wenn die Einwirkung eines beliebigen Streßfaktors zu einem Strain führt, ist zu erwarten, daß dadurch die Reaktion des Systems auf einen anderen Streßfaktor geändert wird: Der Bereich des elastischen Strain kann kleiner werden, der zusätzliche Streßfaktor kann bereits bei geringerer Einwirkungsintensität zu plastischem Strain führen als dies im unbelasteten System der Fall gewesen wäre.

Der natürlich auf Waldökosysteme einwirkende Streß läßt sich auf zwei Ursachen zurückführen: die Variabilität des Klimas und die begrenzte Lebensdauer der Systemelemente, d. h. der Organismen und der Strukturen des Ökosystems. Beim Klima kann man verschiedene Komponenten unterscheiden. Während der Mensch die anderen Klimakomponenten bisher wohl höchstens örtlich verändert hat, hat er zweifelsfrei das chemische Klima großräumig, d. h. kontinental, vielleicht hemisphärisch oder sogar global verändert. In Mitteleuropa

Foto: dpa

Bild 2: Schwermetall verarbeitende Betriebe gefährden den Baumbestand bei Röthenbach (Pegnitz): Diese Geschwulste an zahlreichen Kiefern in einem 300 Hektar großen Waldgebiet sind zusammen mit braunen Nadeln ein untrügliches Zeichen dafür, daß die Bäume durch Schwermetall in Luft und Boden schwer geschädigt sind und bald absterben werden.

sind die Eintragsraten in die Waldökosysteme heute um den Faktor 10 (z. B. für Nährstoffe) bis 100 oder mehr (Säure, viele Schwermetalle und organische Stoffe) höher als man für eine vom Menschen unberührte Natur annehmen kann.

Dies läßt Ausmaß und Umfang der Belastung erkennen. Es macht ferner deutlich, daß die klimatisch exponierten Ökosysteme den durch die Veränderung des chemischen Klimas bewirkten Streßfaktoren am stärksten ausgesetzt sein werden, also z. B. Wälder in den Stau- und Plateaulagen der Mittelgebirge.

Es ist unmöglich anzunehmen, daß eine solche Veränderung der Eintragsraten ohne Einfluß auf die Ökosysteme bleibt. Die Vegetationskunde hat ein umfangreiches Material erarbeitet, das zeigt, welche Bedeutung die kleinstandörtliche Differenzierung des Wärme- und Feuchteklimas für die Ausbildung des Ökosystems hat. Aus der Kenntnis der Prinzipien des Stoffhaushalts von Waldökosystemen kann diese Erkenntnis dadurch ergänzt werden, daß schon wesentlich geringere Veränderungen in den Stoffeintragsraten, als sie in Mitteleuropa heute gegeben sind, zu Veränderungen der Ökosysteme führen müssen.

Die Veränderung der chemischen Umwelt der Pflanze macht sich an Blatt-, Rinden- und Wurzeloberflächen, d. h. an der gesamten äußeren Oberfläche der Pflanze bemerkbar. Die Untersuchungen im Solling zeigen, daß hierbei episodisch immer wieder extreme Belastungen auftreten. Im Kronenraum kann dies in Verbindung mit dem Eintrag stark saurer Wolkentröpfchen, anhaltender Nebelnässe (hohe „trockene Deposition" von SO_2 mit Säurebildung) oder beim Tauen einer alten, mit deponierter Säure und Schadstoffen angereicherten Schneedecke der Fall sein. Im Wurzelraum kann die extreme Belastung an eine witterungsbedingte starke Entkopplung im Ionenkreislauf des Ökosystems geknüpft sein.

Treffen solche Episoden auf eine durch mechanischen, thermischen oder Austrocknungs-Streß veränderte Pflanzenoberfläche, so können Stoffe aus der Umwelt (SO_2, H^+, Schwermetalle, Al-Ionen) lebende Membranen erreichen und in den Stoffwechsel gelangen bzw. zu Zellschäden führen. Im letzteren Fall entstehen „chemische Wunden", durch die außer Ionen auch Schadorganismen eindringen können, sei es in das Blatt, in die Rinde oder in die Wurzel. Der erstere Fall bedeutet das Einschleusen von Gift in subletalen Dosen in den Stoffwechsel, wobei jede neue derartige Episode eine Erhöhung dieser Giftmenge bewirkt.

Dies könnte zur langsamen Vergiftung der Pflanze führen und sich auf die Produktion sekundärer Pflanzenstoffe auswirken. Soweit diese Stoffe Schutzfunktionen gegenüber pathogenen Organismen haben, werden diese beeinträchtigt. Dies kann zur Folge haben, daß sich im lebenden Baum mehr und mehr pathogene Organismen halten können, die bei einer weiteren Vitalitätsschwächung des Baumes zur Schädigung führen.

Die Wissenschaft muß die Frage stellen, wieso die geschilderten Zusammenhänge mit der Konsequenz der Gefährdung der Ökosphäre erst jetzt, nachdem die Anfänge der Schädigung bereits sichtbar sind, erkannt wurden. Auf diese Frage gibt es viele Antworten.

Im Verlauf von über 100 Jahren Rauchschadensforschung wurde die Hy-

pothese über die Ursache der Rauchschäden mehr und mehr eingeengt. Schon im vorigen Jahrhundert wurde ausführlich die Beteiligung von Schwermetallen diskutiert, ohne allerdings damals Hinweise dafür zu finden. *Wieler* [8] machte bereits 1913 auf den Säureeintrag, die Bodenversauerung und ihre Folgen für die Vitalität der Bäume aufmerksam, wobei auch er sich mit dem Vorwurf auseinandersetzen muß, er würde diese Schadenskomponente verabsolutieren.

Beide Aspekte sind mit den Jahrzehnten aus der Rauchschadenshypothese verschwunden. Was sich die Wissenschaft selbst vorwerfen muß, ist nicht, daß sie einer falschen Hypothese gefolgt wäre, sondern daß die Hypothese, nach der sie ihre Forschung ausgerichtet hat, unvollständig war. Die Hochschornstein-Politik der TA Luft ist die absolut logische Konsequenz der im Wesentlichen auf die direkte Schadwirkung von Gasen, bes. SO_2, eingeschränkten Rauchschadenshypothese. Wie dieses Beispiel zeigt, haben wissenschaftliche Hypothesen Auswirkungen auf das Verhalten der Gesellschaft, sie lenken oft unbewußt die technische Entwicklung und damit Investitionen.

Risikovermeidung

Die Wissenschaft muß sich dieser indirekten Verantwortung bewußt werden. Sie darf sich nicht in ihrer gesellschaftlichen Aussage auf das Beweisbare zurückziehen, sondern sie muß im Sinn einer Risikoanalyse der Gesellschaft nach bestem Wissen und Gewissen sagen, welche Risiken bestimmte Entwicklungen möglicherweise in sich bergen.

Das in den letzten Jahren einsetzende Waldsterben hat gewissermaßen die Hypothese falsifiziert, die Wissenschaft könne ökotoxikologische Entwicklungen selbst dieses Ausmaßes mit Sicherheit rechtzeitig erkennen, und das heißt vorhersagen. Die Alternativ-Hypothese lautet, daß die Wissenschaft eben dies nicht kann. Hieraus sind Folgerungen zu ziehen. Eine Folgerung ist die Durchführung von Risikoanalysen. Andere Folgerungen betreffen die Risikovermeidung.

Die Wissenschaft sieht sich nunmehr vor die Frage gestellt, der Gesellschaft Hinweise zur Risikovermeidung zu geben. Diese Hinweise können spezieller oder allgemeiner Natur sein.

Die speziellen Hinweise liegen oft auf der Hand. Im vorliegenden Fall lassen sich z. B. nennen: Verringerung der Emission aus Kraftwerken, Verkehr und Industrieanlagen; Verbesserung der Energieausnutzung (z. B. Wärme/Kraft-Kopplung, Nutzung von Prozeßwärme, Gebäudeisolierung: Verringerung des Energiebedarfs); Übergang zu emissionsarmen Energieträgern (Solarenergie, Wasser- und Windenergie, Erdwärme, Kernenergie). Zwischen diesen Möglichkeiten muß entschieden werden. Die Entscheidung sollte auf einer Nutzen/Kosten-Analyse aufbauen. Nun zeigt jedoch das Waldsterben (genau so wie Verwitterungsschäden an Gebäuden usw.), daß die Kosten der Energiegewinnung bisher nicht vollständig erfaßt werden: die Kostenerfassung hört am Schornstein bzw. am Auspuff auf. Die Kosten für die Säurenneutralisierung in der Ökosphäre werden jetzt erst sichtbar, ihre Begleichung ist bisher auf die Zukunft verschoben worden. Die betriebswirtschaftliche Rechnung des Kraftwerkbetreibers und des Energieverbrauchers ist also keine Grundlage für eine Nutzen/Kosten-Analyse.

Der Ausweg ist naheliegend: Die Umweltschäden müssen rechtzeitig beziffert werden, so daß sie in eine Nutzen/Kosten-Analyse eingehen können. Dies ist jedoch im Prinzip unmöglich. Solange die Wissenschaft eine mögliche Umweltschädigung nicht mit Sicherheit vorhersagen kann, sondern nur auf dem Wege einer Risikoanalyse auf verschiedene Möglichkeiten aufmerksam machen kann, gibt es auch keine Sicherheit über die in der Umwelt anfallenden Kosten. Das ökonomische Prinzip stößt hier an eine Grenze, die auf lange Sicht noch unüberwindbar ist. Wir haben uns bisher so verhalten, als könnte die Ökosphäre unseren Abfall verdauen. Es ist nun klar, daß sie das nicht kann. Damit ist diese Grenze sichtbar geworden, und wir müssen uns mit ihr arrangieren. Die Unmöglichkeit, die Kosten von Umweltschäden mit Sicherheit zu beziffern, gilt auch für die Kernenergie.

Pragmatisch bleibt folgender Lösungsweg: Man schätzt die Risiken der möglichen Lösungen; versucht sie soweit als möglich zu quantifizieren (d. h. in Kosten auszudrücken) und versucht das Optimum zu finden. Dieser Weg ist

- konfliktbeladen: man streitet um die Wahrscheinlichkeit bestimmter Risiken
- unsicher: weit vom Optimum entfernte Lösungen sind wegen unzureichender Erkenntnisse nicht auszuschließen, Beispiel Hochschornsteinpolitik, und damit
- selbst risikoreich.

Es wird deutlich, daß sich die Wissenschaft noch um die Lösung einer umfassenderen Aufgabe bemühen muß, nämlich um die Erarbeitung von Hinweisen allgemeiner Natur zur Risikovermeidung. Damit wird eine zentrale Aufgabe der Wissenschaft deutlich. Diese Aufgabe ist von den Ökologen allein nicht lösbar, so wenig sie auch ohne Ökologen lösbar ist. Der einzig realistische Ansatz zur Lösung dieser Aufgabe ist in der Thermodynamik irreversibler Prozesse zu finden. Die Aufgabe lautet ganz konkret, die von *Prigogine* (1979) entwickelten Ansätze aufzugreifen und in interdisziplinärer Arbeit zu versuchen, auf diesen Ansätzen eine Ökosystemtheorie aufzubauen. Die größte Schwierigkeit hierbei dürften die Verständnisschwierigkeiten zwischen Thermodynamikern und Ökologen sein.

Ob Technik oder Landbewirtschaftung – in beiden Fällen gestaltet der Mensch aufgrund von Erfahrung und wissenschaftlichen Erkenntnissen die Ökosphäre zu seinem Nutzen. Hierbei seinen Nutzen nachhaltig zu wahren, ist ihm bisher nicht geglückt und wird ihm auch nicht glücken, so lange er meint, gegen die Gesetze der Natur operieren zu können. Ob die Wissenschaft bereit ist, ihre gesellschaftliche Aufgabe zu erkennen?

B. Ulrich, Institut für Bodenkunde und Waldernährung der Universität, Büsgenweg 2, 3400 Göttingen.

Literatur:

[1] Bundestags-Drucksache: Luftveruneinigung, saurer Regen und Waldsterben. Drucksache 9/1955 vom 7. 9. 82, 17 S. [2] *Nürnberg, H. W.; Valenta, P.; Nyguyen, V. D.* (1982): Wet deposition of toxic metal from the atmosphere in the Federal Republic of Germany. In H. W. Georgii and J-Pankrath (Hrsg.): Deposition of atmospheric pollutants. De Reidel Publ. Co. 1982, S. 143–157.[3] *Wisniewski, J.:* The potential acidity associated with dews, frosts, and fogs. Water, Air and Soil Pollution Band 17 (1982),S. 361–377. [4] *Ulrich, B.:* Gefahren für das Waldökosystem durch Saure Niederschläge. LÖLF-Mitt. Sonderh. 1982, Landesanst. f. Ökologie Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen, S. 9–25. – *Ulrich, B.:* Interaction of forest canopies with atmospheric constitutents: SO_2, alcali and earth alcali cations and chloride. In Accumulating Air Pollutants in Forest Ecosystem (Hrsg. B. Ulrich and J. Pankrath). De Reidel Publ. Co. 1983. [5] *Ulrich, B.; Mayer, R.; Khanna, P. K.:* Deposition von Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen im Solling. Schriften Forstl. Fak. Univ. Göttingen, Band 58 (1972), S. 291. Sauerländer Verlag Frankfurt. *Ulrich, B.:* Destabilisierung von Waldökosystemen durch Akkumulation von Luftverunreinigungen. Forst- u. Holzwirt, Band 36 (1981), S. 525–532. [6] *Mayer, R.:* Interaction of forest canopies with atmospheric constitutents: aluminum and heavy metals. In Accumulating air pollutants in forest ecosystems, Hrsg. B. Ulrich und J. Pankrath, De Reidel Publ. Co. 1983. [7] *Lewitt, J.:* Responses of plants to environment stresses. II. Water, radiation, salt and other stresses. Academic Press, New York 1980. [8] *Wieler, A.:* Die Einwirkung saurer Rauchgase auf Vegetation und Erdboden. Verh. Naturwiss. Ver. Rheinl. West., Band 70 (1913), S. 387–400. *Wieler, A.:* Rauchsäuren als bodenzerstörender Faktor. Angew. Botanik, Band 15 (1933), S. 419–433.